

厦门地区公路桥梁震害预测

黄起益, 曾显通

(厦门大学建筑与土木工程学院 福建厦门 361005)

摘 要: 本文主要介绍了四种基于经验统计法的桥梁震害预测方法, 包括久保庆三郎方法、日本土木工程学会方法、朱美珍方法、I. G. Buckle 方法, 并将这些方法应用于厦门地区在役公路桥梁震害预测。

关键词: 桥梁; 震害预测; 厦门

中图分类号: U442.5+5

文献标识码: A

文章编号: 1004-6135(2013)06-0037-03

Seismic damage assessment of highway bridge in Xiamen area

HUANG Qiyi, ZENG Xiantong

(School of Architecture and Civil Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005)

Abstract: The paper mainly describes the bridge seismic damage assessment method based on empirical statistical methods, including Keizaburo KUBO, the Japan Society of Civil Engineering, ZHU MeiZhen and I. G. Buckle method, and applies these 4 methods to seismic damage assessment of highway bridge in Xiamen area.

Keywords: Bridge; Seismic damage assessment; Xiamen

E-mail: zooeymom@163.com

引 言

众所周知, 地震是地壳运动的一种自然表现。它的发生, 人类无法阻止, 只能预防。公路桥梁是生命线工程中不可忽视的重要组成部分, 在抗震救灾中具有显著作用。

厦门, 中国东南沿海副省会城市, 位于台湾海峡西岸, 与我国强震密度和平均震级都最高^[1]的台湾省隔海相望, 经常受到西太平洋强震或台湾地区强震余震的影响。目前, 厦门地区在役公路桥梁(大桥、超大桥)超过 30 座, 其中 90% 以上的桥梁^[2]是在《公路桥梁抗震设计细则》(JTG/T B02-01-2008)和《城市桥梁抗震设计规范》(CJJ 166-2011)颁布以前建立的。对于这些在役的公路桥梁, 其整体的抗震性能如何, 一直是人们关注的焦点。

1 桥梁震害预测方法

桥梁震害预测常被作为公路交通系统安全性评估、桥梁加固优先级评价和地震应急决策的必要参考依据之一, 在国内外广泛应用。常见的桥梁震害预测方法包括经验统计法、规范校核法、模糊综合评估法、人工神经网络法、动态时程分析法、非线性静力弹塑性分析方法等六种方法。这六种方法中, 前面四种是定性分析, 后两种是定量分析, 能够用于一个地区大量桥梁的震害预测只能采用定性分析。本文选用操作性最强的经验统计法作为厦门地区公路桥梁震害预测方法。

选用经验统计法主要是因为它不需要通过复杂计算就可以确定桥梁在未来地震中可能的破坏等级, 特别是涉及某个地区或城市大量桥梁需要进行震害预测时, 使用起来经济方便。所谓的经验统计法^[3]就是先根据历史震害经验、桥梁抗震知

识及桥梁样本所提供的资料, 选择影响桥梁震害的主要因素, 再根据大量样本进行各影响因素的影响方式和权值的统计回归, 建立桥梁震害经验预测公式的一种地震安全评估方法。其误差主要来源于桥梁震害影响因素取舍、回归公式形式、桥梁样本数、影响因素相互作用等几个方面。

常见的经验统计法主要包括久保庆三郎方法(1982)、日本土木工程学会方法(1986)、周神根方法(1988)、朱美珍方法(1990)、I. G. Buckle 方法(1995)以及 ATC-6-2 和 Caltrans 中的类似方法等。

理论上, 当同时采用两种或两种以上方法进行桥梁震害预测就能基本满足预测精度要求, 但是笔者为了增加桥梁震害样本数, 同时选用久保庆三郎方法、日本土木工程学会方法、朱美珍方法和 I. G. Buckle 方法四种国内应用最多的方法。

1.1 久保庆三郎方法

久保庆三郎方法(1982)^[4-5]统计了遭受严重震害的 30 座公路桥梁资料, 考虑了地震烈度、场地条件、液化、上部结构类型、支座类型、墩台高度、孔数、支承宽度、基础形式、墩台材料 10 个影响因素, 通过定义它们的易损性指数进行相乘, 如果得到的值大于 30, 则上部结构是危险的, 有可能落梁。

该方法各因素的权利系数见表 1, 其基本公式为:

$$D = \prod W_{jk}^{x_{jk}} \quad (1)$$

式中 D 为桥梁震害参考指标, $D \geq 30$ 时, 桥梁会发生落梁; W_{jk} 为选择的各类因素权系数; x_{jk} 当第 j 因素第 k 项存在时, 为 1.0, 否则为 0.0。

1.2 日本土木工程学会方法

日本土木工程学会方法(1986)^[6]根据 124 座遭受地震破坏的桥梁资料, 选择设计规范、上部结构类型、上部结构形式(曲梁桥和直梁桥)、上部结构材料、桥轴线坡度、抗落梁措施、基础种类、桩高、场地条件、液化、基础持力层不均匀性、土层杂质、基础材料、基础种类、地面运动强度等 15 个影响因素, 利用



作者简介: 黄起益(1987.11-), 男。

收稿日期: 2013-04-17

统计学方法得到经验公式。该方法上部结构类型中含有斜拉桥和悬索桥,未考虑地震烈度因素,其隐含假定为地震动峰值在 0.25g 以上。另外,在定性分析基础上还包含了主跨中截断和桥墩剪应力的少量计算要求。

该方法各因素的权系数见表 1,其基本公式为:

$$D = \prod W_{jk}^{X_{jk}} \quad (2)$$

式中 D 为桥梁震害参考指标, $D \geq 60$ 时,桥梁易损性较高; $60 > D \geq 20$ 桥梁易损性中等; $D < 20$ 桥梁易损性较低; W_{jk} 为选择的各类因素权系数; X_{jk} 当第 j 因素第 k 项存在时,为 1.0,否则为 0.0。

1.3 朱美珍方法

朱美珍方法(1990)^[7-8]根据唐山、海城、通海地震中 100 多座公路桥梁的震害情况,选择地震烈度、场地类别、地基失效程度、上部结构类型、支座形式、墩台高度、墩台材料、基础形式、桥梁长度 9 个因素,建立了公路桥梁的非线性震害预测经验公式的统计分析,将实际震害度作为因变量,自变量是与影响因素有关的量,假设变量之间是非线性函数关系,建立经验统计公式。

该方法各因素的权系数见表 1,其基本公式为:

$$D = W_0 \prod_{j=1}^9 \prod_{k=1}^{2 \text{ 或 } 3} W_{jk}^{X_{jk}} \quad (3)$$

式中 D 为桥梁震害参考指标; W_0 为计算系数, W_{jk} 为选择的各类因素权系数; X_{jk} 当第 j 因素第 k 项存在时,为 1.0,否则为 0.0。用上式进行桥梁抗震性能评估时,对应于基本完好、轻微破坏、中等破坏、严重破坏、倒塌的临界 D 值为 1.23、2.20、3.38 和 4.40。

1.4 I. G. Buckle 方法

I. G. Buckle 方法(1995)^[9]是通过利用美国从 1964 年 Alaska 地震到 1991 年 Costa Rica 地震期间 11 次地震中 114 座桥梁震害资料,选择地面运动峰值、设计规范、上部结构类型、上部结构外形、跨中铰、桥墩类型、基础类型、墩体材料、规则性、场地条件、液化程度、支座支承长度等 12 个影响因素,通过多参数回归分析建立了震害指数与影响因子的经验公式,并指出地面运动峰值、液化程度、设计规范和支座支承长度是影响桥梁震害的最主要因素。在 I. G. Buckle 方法中,上部结构类型也包括了斜拉桥和悬索桥。

该方法各因素的权系数见表 1,其基本公式为:

$$D = \sum W_{jk} - 3.754 \quad (4)$$

式中 D 为桥梁震害参考指标; W_{jk} 为选择的各类因素权系数。用上式进行桥梁抗震能力评价时,对应于桥梁基本完好、轻微破坏、中等破坏、严重破坏、倒塌的临界 D 值为 0.5、1.5、2.5 和 3.5。

1.5 经验统计法小结

通过前面四种方法的介绍可以看出,每种方法考虑的因素并不完全一样,其取值依据各持一家。桥梁震害影响因素取舍与取值的不同对评估结果影响很大。所以,笔者为了便于收集资料,将四种方法统一在一张统计表格内,对各方法的权系数取值做了部分调整。权系数调整原则是:原方法已考虑的因素,取原值,详见参考文献^{[4]-[9]};原方法未考虑的因素,对公式(1)~(3)取权系数为 1.0,对公式(4)取系数为 0.0。这样就可以尽可能保证与原方法的一致性。最后笔者选取了场地(含类别、液化条件、场地均匀性、抗液化措施 4 个因素)、结构(含上部结构、支座、桥墩、基础 4 个项目 10 个因素)、地震动(以烈度表示)、抗震设防(含设防烈度、设计规范、防落梁措施

3 个因素)等 4 大类 18 个因素作为一级评估参考因素,四种方法的权系数取值和破坏状态临界值分别见(表 1、表 2)。

表 1 各方法各因素权系数表

Table1 weight coefficient of each factor

影响因素			久保庆 三郎 (1982)	日本土 木学会 (1986)	朱美珍 (1990)	I. G. Buckle (1995)		
场地	场地类别	I	0.50	1.00	0.80	0.188		
		II	1.00	1.20	1.00	0.376		
		III	1.50	2.00	1.80	0.564		
		IV	1.80	2.50	2.00	0.752		
	液化条件	液化	2.00	2.00	1.80	3.262		
		可能液化	1.50	1.50	1.50	2.330		
		不液化	1.00	1.00	1.00	0.932		
	场地均匀性	均匀	1.00	1.00	1.00	0.000		
		不均匀	1.00	1.20	1.00	0.000		
	抗液化措施	有	0.70	0.70	0.70	-0.932		
无		1.00	1.00	1.00	0.000			
结构	上部结构	种类	简支	3.00	1.80	1.40	0.456	
			连续	2.00	1.80	1.00	0.342	
			悬臂	3.00	1.80	1.40	0.634	
			拱	1.00	1.20	1.10	0.228	
		规则性	直线或较规则	1.00	1.00	1.00	0.357	
			曲线	1.00	1.20	1.10	0.874	
			坡桥	1.00	1.20	1.10	0.556	
		孔数	≤2	1.00	1.00	1.00	-0.228	
			>2	1.75	1.00	1.20	0.000	
		支座	支座类型	板式橡胶支座	1.00	1.00	1.00	0.000
	盆式橡胶支座			1.00	1.00	1.00	0.000	
	钢板支座			1.15	1.00	1.10	0.000	
	桥墩	高度	H<5m	1.00	1.00	1.00	0.000	
			5m≤H<10m	1.40	1.50	1.10	0.000	
			H>5m	1.70	2.00	1.20	0.000	
			混凝土	1.40	1.00	1.05	0.102	
		材料	钢筋混凝土	1.00	1.00	1.00	0.068	
			圬工砌体	1.40	1.00	1.10	0.136	
			重力式墩	1.00	1.00	1.00	0.029	
		形式	单柱墩	1.00	1.00	1.00	0.087	
			双柱墩	1.00	1.00	1.00	0.058	
			多柱墩	1.00	1.00	1.00	0.058	
			其他	1.00	1.00	1.00	0.029	
			基础	种类	天然浅基础	1.00	1.00	1.00
		柔性基础			1.00	2.00	1.00	-0.024
		单排桩基础			1.40	2.00	1.15	-0.096
		双排桩基础			1.40	1.00	1.15	-0.069
	材料	多排桩基础		1.40	1.00	1.15	-0.048	
		沉井基础		1.00	1.00	1.00	0.000	
		钢筋混凝土		1.00	1.00	1.00	0.000	
承台	混凝土	1.00		1.00	1.00	0.000		
	圬工砌体	1.00		1.00	1.00	0.000		
	高桩承台	1.10		1.00	1.10	0.000		
	低桩承台	1.00		1.00	1.00	0.000		
地震动	地震烈度	7	1.00	1.00	1.00	0.282		
		8	1.00	1.00	1.10	0.423		
		9	2.40	1.00	1.20	0.564		
抗震设防	设防烈度	7	1.00	1.00	1.00	0.000		
		8	1.00	1.00	1.00	0.000		
		9	1.00	1.00	1.00	0.000		
		未设防	1.00	1.00	1.00	0.000		
	抗震设计规范	78 规范以前	1.20	4.00	1.00	1.368		
		78 规范	1.10	2.00	1.00	0.912		
		89 规范	1.00	1.00	1.00	0.456		
	防止落梁措施	有	0.60	1.00	0.70	0.511		
		无	1.00	2.00	1.00	1.523		

表 2 各方法破坏状态临界值
Table2 destruction state of critical value

桥梁震害预测方法	破坏状态及各状态间的临界值 D				
久保庆三郎	D < 30			30 ≤ D	
	不发生落梁			落梁	
日本土木工程学会	D < 20		20 ≤ D < 60		30 ≤ D
	易损性低		易损性中等		易损性高
朱美珍	D < 1. 23	1. 23 ≤ D < 2. 20	2. 20 ≤ D < 3. 38	3. 38 ≤ D < 4. 40	4. 40 ≤ D
	基本完好	轻微破坏	中等破坏	严重破坏	倒塌
I. G. Buckle	D < 0. 5	0. 5 ≤ D < 1. 5	1. 5 ≤ D < 2. 5	2. 5 ≤ D < 3. 5	3. 5 ≤ D
	基本完好	轻微破坏	中等破坏	严重破坏	倒塌

2 厦门地区公路桥梁震害预测

厦门地区在役公路桥梁 除了跨海大桥以外 ,一共有 32 座大桥、特大桥(未计匝道) 其中简支梁桥 2 座(碧溪大桥、机场立交 2 号桥) 、连续梁桥 28 座、拱桥 2 座(天圆大桥、五缘湾大桥) [2] 。

笔者在收集 32 座桥梁资料时发现桥梁的主线桥和匝道、左线与右线评分结果相差甚大 ,所以本文将其分开统计。这样原先参与桥梁震害预测的 32 座桥梁便提升到 71 座。

4 种方法中 除了朱美珍方法得分相对较高以外 ,其他三种方法评估结果相当。本文以简支梁桥——厦门市集美区碧溪大桥的评估结果为例见(表 3、表 4) 。

表 3 碧溪大桥评估分数

Table3 the assessment scores of Bixi bridge

震害预测方法	碧溪大桥
久保庆三郎	11. 25/11. 25/26. 99 [注1]
日本土木工程学会 [注2]	14. 40
朱美珍	2. 48/2. 73/2. 98
I. G. Buckle	0. 166/0. 025/0. 116

注 1: 表中分数“* / * / * ”对应的是“7 级/8 级/9 级”地震作用下的统计分数

注 2: 日本土木工程学会方法不考虑地震等级 ,所以只有一个分数

表 4 碧溪大桥评估结果

Table4 the assessment results of Bixi bridge

震害预测方法	碧溪大桥
久保庆三郎	不发生落梁
日本土木工程学会	易损性低
朱美珍	中等破坏
I. G. Buckle	基本完好

最后 收集 71 座桥梁的震害预测资料 ,评估各桥梁的破坏状态 汇总统计结果(表 5) 。

表 5 统计结果

Table5 statistical results

破坏状态	地震等级	
	7、8 级	9 级
完好和基本完好	19 座	13 座
轻微破坏	51 座	42 座
中等破坏	2 座 [注]	16 座
严重破坏	0 座	0 座
总桥梁数	71 座	71 座

注: 碧溪大桥和机场立交 2 号桥

从表 5 统计结果中各震害程度(破坏状态) 所占的桥梁数可以看出 ,厦门地区大部分桥梁在震后处于轻微破坏状态 ,其中在 7、8 级地震烈度下有 51 座(占 70. 4%) ,在 9 级地震烈度下有 42 座(占 59. 2%) 。只有少数桥梁震后处于基本完好或中等破坏状态 没有一座发生严重破坏。这说明厦门地区在役公路桥梁的抗震性能普遍较好。

这主要是因为这些桥梁的建桥年代相对较近 ,设计人员已经根据以往的设计经验先于《公路桥梁抗震设计细则》(JTG/T B02 - 01 - 2008) 和《城市桥梁抗震设计规范》(CJJ 166 - 2011) 采用延性设计理念——参与桥梁震害预测的桥梁大部分在 2000 ~ 2008 年之间建立 ,此时国内外学者对延性设计理论已

经做了大量研究 [10 - 11] 。

桥梁震害预测结果表明 ,抗震性能最差的桥梁是碧溪大桥和机场立交 2 号桥 这两座桥梁都是简支梁桥 ,在 7、8 级地震作用下最有可能发生“中等破坏”的桥梁。抗震性能相对较差的是一些立交的匝道和部分主线桥 ,如环岛北路 C 匝道、文曾路立交 D 匝道、仙岳路立交 E 匝道、建港路跨线桥、疏港路高架桥、岩内互通立交主线桥等。

其次 ,从表中还能看出 随着地震等级的提高 ,可能发生中等破坏的桥梁亦不断增加——由 7、8 级地震作用下的 1 座上升到 9 级地震作用下的 16 座 ,所占桥梁数比值也从 1. 4% 上升到 22. 5% 。显然这些在不同地震等级下其抗震性能明显“突变”的桥梁是今后桥梁抗震加固研究的重点桥梁。

3 结语

桥梁震害预测工作在我国已经开展 20 余年 ,其方法已经相当成熟。经验统计法作为桥梁震害预测定性分析最重要的方法之一 ,可供于某地区大量桥梁震害预测使用 ,也可作为部分桥梁定量分析前的参考依据。本文主要对各类经验统计法进行了系统总结和完善 ,以提高桥梁震害预测可操作性。

当然 不可否认 这些方法在众多新的桥梁抗震性能评估理论面前已经显得过于传统老旧 ,评估结果也未能尽如人意。例如 ,对于连续刚构桥梁的震害预测 经验统计法具有明显的局限性。同样 应当指出的是实际桥梁震害影响因素复杂多样 ,上述方法还存在诸多不确定性 因此尚需结合工程经验判断加以解决。

参考文献

[1] 叶爱君. 桥梁抗震[M]. 北京: 交通出版社, 2002. 9: 8 - 10.
[2] 厦门市公路局桥隧中心桥梁资料库[E].
[3] 胡勃, 袁万城, 王君杰等. 大型桥梁结构抗震分级设防与安全评定标准[J]. 世界地震工程, 1998(3) : 1 - 9.
[4] 久保庆三郎. 桥梁的震害预测[J]. 张尚识译. 国外地震工程, 1984(5) : 1 - 11.
[5] 久保庆三郎. 工程构筑物抗震性能的研究[J]. 许晏平译. 学术月报(日), 1990. 6.
[6] Kawashima K. 日本公路桥的抗震鉴定和加固[J]. 杨海荣, 郑琦译. 国外桥梁, 1997(2) : 69 - 7.
[7] 朱美珍. 公路桥梁震害预测[A]. 林皋. 第三届全国地震工程会议论文集[C]. 大连: 大连理工大学出版社, 1990: 1797 - 1802.
[8] 朱美珍. 公路桥梁震害预测的实用方法[J]. 同济大学学报, 1994(9) : 279 - 283.
[9] Buckle I G, Kim S H. A vulnerability assessment modal for highway bridges[A]. New York: Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering, Proceedings of the Fourth U. S. Conference [C]. American Society of Civil Engineering, 1995: 493 - 500.
[10] 袁万城, 范立础. 桥梁抗震的延性与隔震设计[J]. 同济大学学报, 1994(4) : 481 - 485.
[11] 范立础, 卓卫东. 桥梁延性抗震设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001. 5: 81 - 97.